

氏 名	松 山 竜 大
学 位 の 種 類	博士 (理学)
学 位 記 番 号	博甲第 253 号
学位授与の日付	2020 年 3 月 31 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文の題目	重力現象における Moyal 量子化に基づく非可換性の効果
論文審査委員	主査 神奈川大学 教授 長 澤 倫 康 副査 神奈川大学 教授 粕 谷 伸 太 副査 神奈川大学 教授 木 村 敬 副査 神奈川大学 教授 中 田 穰 治 副査 神奈川大学 教授 水 野 智 久

【論文内容の要旨】

本論文は、非可換幾何学を利用した量子重力理論の構築を主題としており、有望な定式化手法を提案してその汎用性の一端を具体的に示す他、宇宙物理学および宇宙論的問題への応用にも取り組み、一定の成果を得ている。一般相対性理論と量子論という 20 世紀に築き上げられた物理理論を統合することは、多くの物理学者による意欲的な挑戦にも関わらず、これまでのところ成功していない。自然界に存在する 4 つの基本的な相互作用のうち、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用の 3 つは量子論の枠組みで理解できており、多くの実験事実と整合性を持っている。残りの 1 つである重力相互作用も、当然量子的な理論が存在すると期待されており、宇宙初期やブラックホール中心の特異点では古典物理学である一般相対性理論が破綻することも、その予想を正当化している。こうして、活発な重力理論の研究の歴史からもわかる通り、この分野には膨大な先行研究がある。しかしながら、重力は量子的な性質との折り合いが悪く、超弦理論やループ量子重力理論などの有力な候補は存在するものの、目指すべき正しい方向性さえ模索中であり、実験や観測との比較も難しいのが現実である。

決定的な解決法が見つからない研究の現状を踏まえ、本論文はとりあえず、一般相対性理論では説明できない観測事実が見つかった場合、それらを量子的効果と比較して理論モデルの正否を議論できる土台を築くことに注力している。というのも、本論文で採用された座標の非可換性の導入は、これまでは数学的な無矛盾性を拠り所として時空座標間の交換子の形式の是非を考察するものがほとんどであった。しかし例えば、2019 年 4 月に EHT プロジェクトがブラックホールシャドウ撮影の成功を発表したように、地平面近傍の重力効果の観測は現実味を帯びている。同様に強重力下で発生し、宇宙初期の痕跡ともなる重力波に関しても、2015 年の初検出に端を発するマルチメッセンジャー天文学の進展に日本の重力波検出装置である KAGRA も参画せんとしており、量子効果による一般相対性理論からのずれの検証はますます重要性を増している。それに反してともすれば数学的合理性の追求に偏りがちな理論側の風潮に対し、本研究は一石を投じている。

本論文では、物理量間の演算である積を非可換積に形式的に入れ替えるという新たな視点を導入し、Einstein 方程式や時空の線素、測地線方程式といったものが見かけ上変わらないような定式化を実現した。この手法は現象論的な色合いが濃く、その計算結果が何らかの実験事実と合致することが見出されない限り正当性を示せないものの、計量テンソルやアフィン接続、曲率テンソ

ルといった時空の性質を表す基本的な物理量を具体的に計算し、一様等方空間や球対称時空での各種方程式を導くことが可能となっている。実際、量子重力理論の影響が顕著となる宇宙誕生時において、宇宙の大きさを表すスケールファクターの進化を記述する方程式を摂動的に導出し、宇宙最初期に宇宙が収縮から膨張に転じる解が存在することを見出した。さらには、ブラックホール地平面近くの計量の表式を求めることにより、重力赤方偏移の効果が弱められることを明らかにした。これらの結果は、引力である古典的重力に対して非可換性効果が斥力的に作用する、とみなすことができる。

続いて、直交座標系上に限られていた非可換量子化の手法を一般の座標系に拡張することを目指し、まずは極座標系でカー時空を取り扱えるよう、具体的な計算を実行した。カー時空は一般相対性理論の軸対称解であり、回転するブラックホールを表す時空として広く知られている。そこでは、座標の交換子に登場する非可換性パラメーターが定数ではなく時刻や位置に依存する場合を取り扱うことになる。そのため、直交座標系を利用できた球対称時空や一様等方時空とは異なり、非可換時空の物理量をよく知られた可換時空上の場で表現することを可能にする **Seiberg-Witten** 写像が適用できない。そこで、一般化された **Moyal** 積を使用して、少なくとも座標の非可換性に起因する交換子が、座標変換によって矛盾が生じないように定義できる手法を確立した。本論文では 4 次元時空での極座標系についてのみ考察したが、この手法は一般の座標系に対して有効であると推測できる。また、一貫して観測との比較を重視するという立場から、具体的にカー計量の時間成分を計算し、球対称時空との重力赤方偏移の差異を見積もった。こうして、いくつかの仮定に基づいた現象論的考察ではあるものの、内側外側ともに軸対称ブラックホールのエルゴ領域が広がるという知見が得られている。この結果は古典的重力が弱められていると解釈できるため、先の宇宙進化やブラックホール表面における斥力的効果と同一視でき、座標非可換性がもたらす影響が、異なる解析手法であっても統一的に理解できることを示唆している。

これらの研究成果は他の量子重力研究とも定性的に符合しており、超弦理論やループ量子重力理論などに加え、非可換時空の観点からも研究を進めることにより、量子重力の理解が深まる可能性を強く示唆している。そのための新しい有望な手法を確立した、今後のこの分野の重要な進歩に貢献し得る可能性を秘めている、独創的で挑戦的な論文となっている。

【論文審査の結果の要旨】

本論文の主題は、非可換幾何学を古典的重力理論に適用し、究極の物理理論である量子重力理論を構築するための手がかりを得ることにある。現代物理学が抱える理論的課題の中でも、重力理論の量子化は最も重要で野心的なものの一つである。

研究費獲得や就職活動のため、大学院生を含む若手研究者が、ともすれば確実に成果の約束されるテーマを選びがちな中、学位申請者は困難な研究に主体的に取り組んでおり、すでに 2 本の原著論文を執筆している (1 本は出版済み、1 本は投稿中)。それでも成果をもたすことができたのは、数多の先行研究が美しく魅力的な理論の構築を競う中、とにかく観測と比較可能な計算を実行できることを重視した点であろう。これまでの多くの高精度実験や観測にもかかわらず、一般相対性理論に反する事実は見つかっていない。一方で、重力といえども高エネルギースケールで何らかの量子効果を示すことは必然と信じられている。この点で、将来必ずや実を結ぶであろう研究課題であり、今後続々と蓄積される多様な実験観測データと照らし合わせることで、量子重力研究の進捗に貴重な貢献をもたすことが予期できる。

研究手法の根幹をなす非可換時空の概念は、元々は量子重力に関連づけて編み出されたものではない。しかし、量子的性質の本質を体現する一面として知られている不確定性関係を、重力を時空の歪曲として扱う一般相対性理論に当てはめようとするれば、自然に時空座標の非可換性という発想

に至るであろう。そこで学位申請者はこの取り組みに可能性を見出し、今までの研究があまり着目してこなかった物理量の計算可能性を念頭に、Teleparallel Gravity や Moyal 積、Seiberg-Witten 写像といった既存の周辺分野の成果を大胆かつ機能的に組み込むことで、これまで誰も具体的に示すことができなかった、宇宙進化やブラックホール時空の性質におよぼす量子効果の一端を導き出している。理論的正統性はあくまでも実験によって保証されるため、手がかりが不明瞭な中、確固とした根拠の無い仮定をいくつか行っている。しかしこれは逆に、計算可能性を実現する、という目標が明確であるからこそできたことであり、学位申請者の研究指針が適正であり、研究センスが優れていることをかえって強調しているであろう。結論としての重力の斥力的効果は、あらゆるものが不確定性によってなまされる量子論の特質を鑑みれば、定性的に十分納得できるものであり、実験観測による検証も実行可能と期待される。

以上の結果を考慮し、本論文は博士（理学）論文に十二分に値する論文と結論できる。